

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:**

102 60 745.1

**Anmeldetag:**

23. Dezember 2002

**Anmelder/Inhaber:**

Outokumpu Oyj, Espoo/FI

**Bezeichnung:**

Verfahren und Anlage zur thermischen  
Behandlung von körnigen Feststoffen

**IPC:**

B 01 J 8/42

**PRIORITY  
DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 4. November 2003  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
Der Präsident  
Im Auftrag

Kahle

## VERFAHREN UND ANLAGE ZUR THERMISCHEN BEHANDLUNG VON KÖRNIGEN FESTSTOFFEN

5

### Technisches Gebiet

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur thermischen Behandlung von körnigen Feststoffen in einem Reaktor mit Wirbelschicht, bei dem Mikrowellenstrahlung aus einer Mikrowellen-Quelle in den Reaktor eingespeist wird.

10

Ein solches Verfahren ist aus US 5,972,302 bekannt, wobei man sulfidisches Erz einer durch Mikrowellen unterstützten Oxidation unterwirft. Hierbei geht es vor allem um die Röstung von Pyrit im Wirbelbett, wobei die in das Wirbelbett geleiteten Mikrowellen die Bildung von Hämatit und Elementarschwefel begünstigen und die SO<sub>2</sub>-Bildung unterdrücken. Man arbeitet hierbei in einem stationären Wirbelbett, welches von der direkt darüber befindlichen Mikrowellen-Quelle angestrahlt wird. Dabei kommt die Mikrowellen-Quelle oder aber die Eintrittsstelle der Mikrowellen zwangsläufig mit den aus dem Wirbelbett aufsteigenden Gasen, Dämpfen und Stäuben in Berührung.

15

20

Beispiele für mögliche Ankopplungen der Mikrowellenquelle an Wirbelmischkammern sind: offener Hohlleiter, Schlitzantenne, Koppelschleife, Blende, mit Gas oder einem anderen Dielektrikum gefüllte Koaxialantenne, mit einem mikrowellentransparenten Stoff abgeschlossener Hohlleiter.

25

In der EP 0 403 820 B1 wird ein Verfahren zum Trocknen von Stoffen in einer Wirbelschicht beschrieben, bei dem die Mikrowellen-Quelle außerhalb der Wirbelschicht angeordnet ist und die Mikrowellen mittels Hohlleiter in die Wirbelschicht eingeleitet werden. Bei offenen Hohlleitern besteht die Gefahr, dass die Mikrowellen-Quelle im Laufe der Zeit durch Staub oder Gase verdeckt und

30

beschädigt wird. Dies kann durch mikrowellentransparente Fenster vermieden werden, die den Hohlleiter zwischen dem Reaktor und der Mikrowellenquelle abschließen. Allerdings führen in diesem Fall Ablagerungen auf dem Fenster zu einer Beeinträchtigung der Mikrowelleneinstrahlung.

5

### Beschreibung der Erfindung

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zu Grunde, einen Wirbelschichtreaktor mit besonders guten Wärme- und Stoffaustauschbedingungen zu schaffen, wobei die Mikrowellen-Quelle gegen die entstehenden Gase, Dämpfe und Stäube geschützt ist.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren der eingangs genannten Art gelöst, bei dem ein erstes Gas oder Gasgemisch von unten durch ein vorzugsweise zentrales Gaszufuhrrohr (Zentralrohr/Zentraldüse) in eine Wirbelmischkammer des Reaktors eingeführt wird, wobei das Gaszufuhrrohr wenigstens teilweise von einer durch Zufuhr von Fluidisierungsgas fluidisierten, stationären Ringwirbelschicht umgeben wird, und bei dem die Mikrowellenstrahlung der Wirbelmischkammer durch dasselbe Gaszufuhrrohr zugeführt wird.

Überraschenderweise lassen sich mit dem erfindungsgemäßen Verfahren bei der Wärmebehandlung die Vorteile einer stationären Wirbelschicht, wie ausreichend lange Feststoffverweilzeit, und die einer zirkulären Wirbelschicht, wie guter Stoff- und Wärmeaustausch, unter Vermeidung der Nachteile beider Systeme miteinander verbinden. Beim Passieren des oberen Bereichs des Zentralrohrs reißt das erste Gas bzw. Gasgemisch Feststoff aus dem ringförmigen stationären Wirbelbett, welches als Ringwirbelschicht bezeichnet wird, bis in die Wirbelmischkammer mit, wobei sich aufgrund der hohen Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Feststoff und erstem Gas eine intensiv durchmischte Suspension bildet und ein optimaler Wärme- und Stoffaustausch zwischen den

beiden Phasen erreicht wird. Zur Erzeugung der notwendigen Prozesswärme wird erfindungsgemäß Mikrowellenstrahlung eingesetzt. Da die Mikrowellen auch durch das Zentralrohr in den Reaktor eingeführt werden, herrscht die größte Mikrowellenleistungsdichte in der Wirbelmischkammer oberhalb der Mündung des Zentralrohrs, wo die in der Suspension enthaltenen Feststoffe die Mikrowellen besonders gut absorbieren. Daher ist die energetische Ausnutzung der Mikrowellen bei dem erfindungsgemäßen Verfahren besonders effektiv. Durch den Gasstrom aus dem Zentralrohr wird auch zuverlässig vermieden, dass Staub oder Prozessgase in das Zentralrohr eintreten, sich bis zu der Mikrowellen-Quelle ausbreiten und diese beschädigen. Daher kann erfindungsgemäß auf mikrowellentransparente Fenster zur Abschirmung des Hohlleiters verzichtet werden, wie sie im Stand der Technik üblich sind. Bei diesen besteht nämlich das Problem, dass Ablagerungen von Staub oder anderen Feststoffen auf dem Fenster die Mikrowellenstrahlung beeinträchtigen und teilweise absorbieren können.

Es hat sich herausgestellt, dass gute Prozesseigenschaften dann gegeben sind, wenn die Gasgeschwindigkeiten des ersten Gases oder Gasgemisches sowie des Fluidisierungsgases für die Ringwirbelschicht derart eingestellt werden, dass die Partikel-Froude-Zahlen in dem Gaszufuhrrohr zwischen 1 und 100, in der Ringwirbelschicht zwischen 0,02 und 2 sowie in der Wirbelmischkammer zwischen 0,3 und 30 betragen. Durch die entsprechende Einstellung der Gasgeschwindigkeiten des ersten Gases bzw. Gasgemisches und des Fluidisierungsgases sowie des Füllstandes in der Ringwirbelschicht kann dann die Feststoffbeladung der Suspension oberhalb des Mündungsbereiches des Zentralrohrs in weiten Bereichen variiert und bspw. bis zu 30 kg Feststoff pro kg Gas gesteigert werden, wobei der Druckverlust des ersten Gases zwischen dem Mündungsbereich des Zentralrohrs und dem oberen Austritt der Wirbelmischkammer zwischen 1 mbar und 100 mbar liegen kann. Im Falle hoher Feststoffbeladungen der Suspension in der Wirbelmischkammer regnet ein Großteil der

Feststoffe aus der Suspension aus und fällt in die Ringwirbelschicht zurück. Diese Rückführung wird interne Feststoffrezirkulation genannt, wobei der in dieser internen Kreislaufströmung zirkulierende Feststoffstrom normalerweise bedeutend größer als die dem Reaktor von außen zugeführte Feststoffmenge ist, bspw. eine Größenordnung höher. Der (geringere) Anteil an nicht ausfallen-

5 dem Feststoff wird zusammen mit dem ersten Gas bzw. Gasgemisch aus der Wirbelmischkammer ausgetragen. Die Verweilzeit des Feststoffs in dem Reaktor kann durch die Wahl von Höhe und Querschnittsfläche der Ringwirbelschicht in weiten Grenzen verändert und der angestrebten Wärmebehandlung angepasst werden. Aufgrund der hohen Feststoffbeladung einerseits und der guten Sus-

10 pendierung des Feststoffs im Gasstrom andererseits ergeben sich oberhalb des Mündungsbereiches des Zentralrohrs hervorragende Bedingungen für guten Stoff- und Wärmeaustausch durch die in diesem Bereich einwirkende Mikrowellenstrahlung. Der mit dem Gasstrom aus dem Reaktor ausgetragene Anteil an

15 Feststoff wird dem Reaktor vollständig oder zumindest teilweise wieder zurückgeführt, wobei die Rückführung zweckmäßigerweise in die stationäre Wirbelschicht erfolgt. Der auf diese Weise in die Ringwirbelschicht zurückgeführte Feststoffmassenstrom liegt normalerweise in der gleichen Größenordnung wie der dem Reaktor von außen zugeführte Feststoffmassenstrom. Abgesehen von der hervorragenden Energieausnutzung besteht ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens in der Möglichkeit, durch Änderung der Strömungs-

20 geschwindigkeiten des ersten Gases bzw. Gasgemisches und des Fluidisierungsgases den Energietransfer des Verfahrens und den Stoffdurchsatz schnell, einfach und zuverlässig den Anforderungen anzupassen.

25 Um einen besonders effektiven Wärmeaustausch in der Wirbelmischkammer und eine ausreichende Verweilzeit in dem Reaktor sicherzustellen, werden die Gasgeschwindigkeiten des ersten Gasgemisches und des Fluidisierungsgases für das Wirbelbett vorzugsweise derart eingestellt, dass die dimensionslose

30 Partikel-Froude-Zahlen ( $Fr_p$ ) in dem Zentralrohr 1,15 bis 20, in der Ringwirbel-

schicht 0,115 bis 1,15 und/oder in der Wirbelmischkammer 0,37 bis 3,7 betragen. Dabei sind die Partikel-Froude-Zahlen jeweils nach der folgenden Gleichung definiert:

5

$$Fr_p = \frac{u}{\sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} * d_p * g}}$$

mit

u = effektive Geschwindigkeit der Gasströmung in m/s

$\rho_s$  = Dichte der Feststoffpartikel in kg/m<sup>3</sup>

10  $\rho_f$  = effektive Dichte des Fluidisierungsgases in kg/m<sup>3</sup>

$d_p$  = mittlerer Durchmesser der beim Reaktorbetrieb vorliegenden Partikel des Reaktorinventars (bzw. der sich bildenden Teilchen) in m

g = Gravitationskonstante in m/s<sup>2</sup>.

15 Bei der Anwendung dieser Gleichung gilt zu berücksichtigen, dass  $d_p$  nicht den mittleren Durchmesser ( $d_{50}$ ) des eingesetzten Materials bezeichnet, sondern den mittleren Durchmesser des sich während des Betriebs des Reaktors bildenden Reaktorinventars, welcher von dem mittleren Durchmesser des eingesetzten Materials (Primärteilchen) signifikant in beide Richtungen abweichen kann.

20 Auch aus sehr feinkörnigem Material mit einem mittleren Durchmesser von bspw. 3 bis 10 µm können sich bspw. während der Wärmebehandlung Teilchen (Sekundärteilchen) mit einem mittleren Durchmesser von 20 bis 30 µm bilden. Andererseits zerfallen manche Materialien, bspw. Erze, während der Wärmebehandlung.

25

In Weiterbildung des Erfindungsgedankens wird vorgeschlagen, den Füllstand an Feststoff in dem Reaktor so einzustellen, dass sich die Ringwirbelschicht bspw. zumindest teilweise um einige Zentimeter über das obere Mündungsende

des Zentralrohrs hinaus erstreckt und somit ständig Feststoff in das erste Gas oder Gasgemisch eingetragen und von dem Gasstrom zu der oberhalb des Mündungsbereichs des Zentralrohres befindlichen Wirbelmischkammer mitgeführt wird. Auf diese Weise wird eine besonders hohe Feststoffbeladung der Suspension oberhalb des Mündungsbereiches des Zentralrohrs erreicht.

Erfindungsgemäß wird vorgeschlagen, dass das Zentralrohr als Hohlleiter ausgebildet ist, so dass die Mikrowellenstrahlung direkt durch das Zentralrohr als entsprechender Mikrowellenleiter in die Wirbelmischkammer des Reaktors eingespeist wird. Diese Anordnung bietet sich insbesondere dann an, wenn das auch durch das Zentralrohr geführte erste Gas oder Gasgemisch (Prozessgas) nicht stark mit Staub verunreinigt ist oder der Staub die Mikrowellenleistung auf dem Wege durch das Zentralrohr nur marginal einkoppelt. Wenn dagegen im Prozessgas enthaltener Staub die Mikrowellenleistung stark einkoppelt, kann die Mikrowellen-Strahlung alternativ oder zusätzlich durch mindestens einen von dem Zentralrohr verschiedenen Hohlleiter in die Wirbelmischkammer eingespeist werden, welcher in dem Zentralrohr angeordnet ist und vorzugsweise etwa im Bereich der Mündung des Zentralrohres endet. Damit kann die Mikrowellenstrahlung ebenso gezielt im Bereich der Wirbelmischkammer des Reaktors eingekoppelt werden, ohne dass in dem ersten Gasgemisch enthaltener Staub vorher einen Teil der Leistung der Mikrowellenstrahlung absorbiert hat. In beiden Fällen werden erfindungsgemäß so hohe Gasgeschwindigkeiten gewählt, dass ein Zurücktreten des Staubes aus dem Reaktor in das Zentralrohr und den Hohlleiter verhindert wird.

Eine Verbesserung des Verfahrens wird erreicht, wenn die Mikrowellenstrahlung durch mehrere Hohlleiter eingespeist wird, wobei jeder Hohlleiter mit einer eigenen Mikrowellen-Quelle versehen ist. Dazu können statt eines im Durchmesser großen Zentralrohres als Hohlleiter mehrere Zentralrohre als Hohlleiter ausgebildet sein, an die jeweils eine eigene Mikrowellen-Quelle angeschlossen

ist. Alternativ dazu können erfindungsgemäß auch ein oder mehrere Hohlleiter mit kleinerem Querschnitt durch ein großes Zentralrohr in das Innere des Reaktors durchgeführt werden, wobei die Hohlleiter gegen das Zentralrohr gasdicht abgeschlossen sind und jeder Hohlleiter mit einer eigenen Mikrowellen-Quelle versehen ist. Durch das Zentralrohr wird dann nach wie vor bspw. staubbeladenes Prozessgas in die Wirbelschichtkammer eingeleitet. Durch eine solche modulare Bauweise ist auch eine erhöhte Verfügbarkeit der Anlage realisierbar.

Erfindungsgemäß wird ferner ein Spülgas durch den Reaktor geführt, bei dem es sich bspw. um gefiltertes oder sonstwie gereinigtes Abgas aus dem Reaktor oder einem parallelen Prozess handeln kann. Aufgrund des kontinuierlichen Spülgas-Stroms durch den Hohlleiter werden Feststoff-Ablagerungen im Hohlleiter vermieden, die in unerwünschter Weise den Querschnitt des Hohlleiters verändern und einen Teil der Mikrowellen-Energie absorbieren würden, die ursprünglich für die Feststoffe im Reaktor ausgelegt war. Durch die Energieaufnahme im Hohlleiter würde sich dieser zudem stark erwärmen, wodurch das Material einem starken thermischen Verschleiß ausgesetzt wäre. Außerdem würden Feststoff-Ablagerungen im Hohlleiter unerwünschte Rückkopplungen auf die Mikrowellen-Quelle bewirken.

Als Quellen für die elektromagnetischen Wellen (Mikrowellen-Quellen) eignen sich bspw. ein Magnetron oder ein Klystron. Ferner können Hochfrequenzgeneratoren mit entsprechenden Spulen oder Leistungstransistoren eingesetzt werden. Die Frequenzen der von der Mikrowellen-Quelle ausgehenden elektromagnetischen Wellen liegen üblicherweise im Bereich von 300 MHz bis 30 GHz. Vorzugsweise werden die ISM-Frequenzen 435 MHz, 915 MHz und 2,45 GHz verwendet. Die optimalen Frequenzen werden zweckmäßigerweise für jeden Anwendungsfall im Probetrieb ermittelt. Da die Frequenzen der Mikrowellen-Quellen festliegen, ist damit auch die maximale Heizleistung festgelegt. Durch Installation einer Vielzahl von kleinen Mikrowellen-Quellen kann die Heizleistung



der Wirbelschicht jedoch optimal eingestellt werden. Erfindungsgemäß ist weiter vorgesehen, den Querschnitt und die Abmessungen des Hohlleiters an die verwendete Frequenz der Mikrowellenstrahlung anzupassen, um einen möglichst verlustfreien Energieeintrag zu ermöglichen.

5

Die Temperaturen im Wirbelbett (stationäre Ringwirbelschicht) liegen üblicherweise im Bereich von 150 bis 1500 °C. Für bestimmte Prozesse kann zusätzliche Wärme bspw. durch indirekten Wärmeaustausch in das Wirbelbett eingebracht werden. Für die Temperaturmessung im Wirbelbett eignen sich isolierte Messfühler, Strahlungspyrometer oder faseroptische Sensoren.

10

Zur Einstellung der mittleren Feststoffverweilzeit in dem Reaktor ist erfindungsgemäß vorgesehen, aus dem Reaktor ausgetragenen und in einem nachgeschalteten Abscheider abgeschiedenen Feststoff zumindest teilweise in die Ringwirbelschicht des Reaktors zurückzuführen. Der übrige Anteil wird dann weiteren Verfahrensschritten zugeleitet. Nach einer bevorzugten Ausführungsform ist dem Reaktor dazu ein Zyklon zur Abtrennung von Feststoffen nachgeschaltet, wobei der Zyklon eine zu der Ringwirbelschicht des Reaktors führende Feststoffleitung aufweist.

15

20

Eine weitere Verbesserung ergibt sich, wenn das durch die Hohlleiter eingespeiste Gas auch für die Fluidisierung des Wirbelbettes genutzt wird. Es wird also ein Teil des Gases zur Entstaubung des Hohlleiters verwendet, das bisher durch andere Zuführleitungen in die Wirbelschicht eingeleitet wurde.

25

Erfindungsgemäß wird als Ausgangsmaterial feinkörniger Feststoff verwendet, wobei die Korngröße zumindest des größten Teils der Feststoffe kleiner als 1 mm ist. Bei den zu behandelnden körnigen Feststoffen kann es sich z.B. um Erze und insbesondere sulfidische Erze handeln, die z.B. für die Gewinnung von Gold, Kupfer oder Zink vorbereitet werden. Ferner kann man Recycling-Stoffe,

30

z.B. zinkhaltiges Wälzoxid oder Abfallstoffe einer thermischen Behandlung im Wirbelbett unterwerfen. Wenn man sulfidische Erze, wie z.B. goldhaltigen Arsenopyrit, dem Verfahren unterzieht, wird das Sulfid zu Oxid umgewandelt und dabei bei geeigneter Verfahrensführung bevorzugt elementarer Schwefel und nur geringe Mengen  $\text{SO}_2$  gebildet. Das erfindungsgemäße Verfahren lockert die Struktur des Erzes in günstiger Weise auf, so dass eine anschließende Laugung zu verbesserten Erträgen führt. Das durch die thermische Behandlung bevorzugt gebildete Arsen-Eisen-Sulfid ( $\text{FeAsS}$ ) ist problemlos deponierbar.

Eine erfindungsgemäße Anlage, welche insbesondere zur Durchführung des zuvor beschriebenen Verfahrens geeignet ist, weist einen als Wirbelschichtreaktor ausgebildeten Reaktor zur Wärmebehandlung von feinkörnigen Feststoffen und eine Mikrowellen-Quelle auf. An den Reaktor ist ein Gaszuführungssystem, welches insbesondere ein Gaszufuhrrohr aufweisen kann, angeschlossen, welches derart ausgebildet ist, dass durch das Gaszuführungssystem strömendes Gas Feststoff aus einer stationären Ringwirbelschicht, die das Gaszuführungssystem wenigstens teilweise umgibt, in eine Wirbelmischkammer des Reaktors mitreißt, und dass die durch die Mikrowellenquelle erzeugte Mikrowellenstrahlung durch das Gaszuführungssystem einspeisbar ist. Vorzugsweise erstreckt sich dieses Gaszuführungssystem bis in die Wirbelmischkammer.

Erfindungsgemäß weist das Gaszuführungssystem vorzugsweise ein sich vom unteren Bereich des Reaktors im Wesentlichen vertikal nach oben vorzugsweise bis in die Wirbelmischkammer des Reaktors erstreckendes Gaszufuhrrohr (Zentralrohr) auf, welches von einer wenigstens teilweise um das Zentralrohr herumführenden Kammer umgeben ist, in der die stationäre Ringwirbelschicht ausgebildet ist. Das Zentralrohr kann an seiner Austrittsöffnung als Düse ausgebildet sein und/oder eine oder mehrere, verteilt angeordnete Öffnungen in seiner Mantelfläche aufweisen, so dass während des Reaktorbetriebs ständig Feststoff über die Öffnungen in das Zentralrohr gelangt und mit dem ersten Gas

oder Gasgemisch durch das Zentralrohr bis in die Wirbelmischkammer mitgeführt wird. Selbstverständlich können in dem Reaktor auch zwei oder mehr Zentralrohre mit unterschiedlichen oder gleichen Ausmaßen und Form vorgesehen sein. Vorzugsweise ist jedoch wenigstens eines der Zentralrohre, bezogen auf die Querschnittsfläche des Reaktors, in etwa mittig angeordnet.

Erfindungsgemäß wird die Mikrowellenstrahlung dem Reaktor in einem Hohlleiter zugeführt. Mikrowellenstrahlung kann in elektrisch leitfähigen Hohlprofilen unterschiedlichster Geometrie geleitet werden, solange gewisse Mindestabmessungen nicht unterschritten werden. Der Hohlleiter besteht ganz oder weitgehend aus elektrisch leitendem Material, bspw. Kupfer. In einer ersten Ausführungsform ist das Gaszufuhrrohr direkt als Hohlleiter zum Einspeisen der Mikrowellen ausgebildet. Neben dem einfachen Aufbau eines derart ausgebildeten Reaktors wird durch den zusätzlich in dem Hohlleiter befindlichen Gasstrom vermieden, dass Staub oder andere Verunreinigungen durch den Hohlleiter bis zu der Mikrowellen-Quelle vordringen und diese beschädigen. Zudem kann das Gas in dem Gaszufuhrrohr durch die Mikrowellen abhängig von der Absorptionsefähigkeit des Gases oder in ihm enthaltener Partikel bereits vorgewärmt werden.

Alternativ oder zusätzlich kann in dem Gaszufuhrrohr erfindungsgemäß mindestens ein separater Hohlleiter zum Einspeisen der Mikrowellenstrahlung in den Reaktor bspw. in Form einer Lanze angeordnet sein. Wenn der Hohlleiter in etwa im Mündungsbereich des Zentralrohrs oder kurz unterhalb endet, wird durch den in die Wirbelmischkammer einströmenden Gasstrom ein Eintritt von Verunreinigungen in den Hohlleiter vermieden. Gleichzeitig kann die Mikrowellenstrahlung im Wesentlichen verlustfrei in den Reaktor eingeleitet werden. Erfindungsgemäß können auch mehrere Gaszufuhrrohre (Zentralrohre) und/oder mehrere Hohlleiter vorgesehen sein, wobei an jeden Hohlleiter eine eigene Mikrowellen-Quelle angeschlossen ist. Damit kann die Mikrowellen-Intensität in dem Reaktor einfach durch Ein- und Ausschalten einzelner Mikro-

wellen-Quellen variiert werden, ohne dass die Intensität oder Frequenz einer Mikrowellen-Quelle verändert werden müsste. Dies ist besonders vorteilhaft, weil es so möglich ist, die optimale Abstimmung der Mikrowellen-Quelle und des jeweils angeschlossenen Hohlleiters beizubehalten und dennoch die Gesamtintensität in dem Reaktor zu verändern.

Die genaue Berechnung der Resonanzbedingungen ist mathematisch recht aufwendig, da letztlich die Maxwell-Gleichungen (instationäre, nichtlineare Differenzialgleichungen) mit den entsprechenden Randbedingungen gelöst werden müssen. Im Falle eines rechteckigen oder runden Hohlleiterquerschnittes lassen sich die Gleichungen aber soweit vereinfachen, dass sie analytisch lösbar sind und daher Probleme bei der Auslegung von Hohlleitern anschaulicher werden und einfacher lösbar sind. Deshalb, und aufgrund der relativ einfachen Herstellbarkeit werden industriell nur Rechteckhohlleiter und Rundhohlleiter eingesetzt, die auch erfindungsgemäß bevorzugt eingesetzt werden. Die hauptsächlich verwendeten Rechteckhohlleiter sind in der angelsächsischen Literatur genormt. Diese Normmaße wurden in Deutschland übernommen, weshalb teilweise ungerade Abmessungen auftreten. In der Regel sind alle industriellen Mikrowellenquellen der Frequenz 2,45 GHz mit einem Rechteckhohlleiter des Typs R26 ausgestattet, der einen Querschnitt von 43 x 86 mm aufweist. In Hohlleitern gibt es unterschiedliche Schwingungszustände: Bei dem transversalen elektrischen Mode (TE-Mode) liegt die elektrische Feldkomponente quer zur Hohlleiterrichtung und die magnetische Komponente in Hohlleiterrichtung. Bei dem transversalen magnetischen Mode (TM-Mode) liegt die magnetische Feldkomponente quer zur Hohlleiterrichtung und die elektrische Komponente in Hohlleiterrichtung. Beide Schwingungszustände können in allen Raumrichtungen mit unterschiedlichen Modenzahlen auftreten (z.B. TE-1-1, TM-2-0).

Die Länge eines Hohlleiters liegt erfindungsgemäß im Bereich von 0,1 bis 10 m. Es hat sich herausgestellt, dass sich Hohlleiter in dieser Länge in der Praxis besonders gut handhaben lassen. Der Hohlleiter kann dabei gerade oder gebogen ausgeführt sein.

5

In der Ringwirbelschicht und/oder der Wirbelmischkammer des Reaktors können erfindungsgemäß Einrichtungen zum Umlenken der Feststoff- und/oder Fluidströme vorgesehen sein. So ist es bspw. möglich, ein ringförmiges Wehr, dessen Durchmesser zwischen dem des Zentralrohrs und dem der Reaktorwand liegt, derart in der Ringwirbelschicht zu positionieren, dass die Oberkante des Wehrs über das sich im Betrieb einstellende Feststoffniveau ragt, während die Unterkante des Wehrs im Abstand zu dem Gasverteiler oder dgl. angeordnet ist. Feststoffe, die in der Nähe der Reaktorwand aus der Wirbelmischkammer ausregnen, müssen so zunächst das Wehr an dessen Unterkante passieren, bevor sie von der Gasströmung des Zentralrohrs wieder in die Wirbelmischkammer mitgerissen werden können. Auf diese Weise wird ein Feststoffaustausch in der Ringwirbelschicht erzwungen, so dass sich eine gleichmäßigere Verweilzeit des Feststoffs in der Ringwirbelschicht einstellt.

10

15

Weiterbildungen, Vorteile und Anwendungsmöglichkeiten der Erfindung ergeben sich auch aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen und der Zeichnungen. Dabei bilden alle beschriebenen und/oder bildlich dargestellten Merkmale für sich oder in beliebiger Kombination den Gegenstand der Erfindung, unabhängig von ihrer Zusammenfassung in den Ansprüchen oder deren Rückbeziehung.

25

### Kurzbeschreibung der Zeichnungen

- Fig. 1 zeigt ein Prozessdiagramm eines Verfahrens und einer Anlage gemäß eines ersten Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung;
- Fig. 2 zeigt einen Reaktor zur Durchführung des Verfahrens gemäß eines zweiten Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung und
- Fig. 3 zeigt einen Reaktor zur Durchführung des Verfahrens gemäß eines dritten Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung.

### Detaillierte Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen

Anhand von Fig. 1 werden die Anlage und das Verfahren zur thermischen Behandlung von Feststoffen zunächst allgemein zur Erläuterung der erfindungsgemäßen Funktionsweise beschrieben.

Die Anlage weist zur Wärmebehandlung von Feststoffen einen bspw. zylindrischen Reaktor 1 mit einem in etwa koaxial mit der Längsachse des Reaktors angeordneten Zentralrohr 3 auf, welches sich vom Boden des Reaktors 1 aus im Wesentlichen vertikal nach oben erstreckt. Im Bereich des Bodens des Reaktors 1 ist ein nicht dargestellter Gasverteiler vorgesehen, in den Zufuhrleitungen 19 münden. In dem vertikal oberen Bereich des Reaktors 1, der eine Wirbelmischkammer 7 bildet, ist ein Auslass 13 angeordnet, der in einen als Zyklon ausgebildeten Abscheider 14 mündet.

Wird nun Feststoff bspw. in Form körniger Erze aus einem Feststoffbunker 5 über die Feststoffleitung 6 in den Reaktor 1 eingebracht, bildet sich auf dem Gasverteiler eine das Zentralrohr 3 ringförmig umgebende Schicht aus, die als Ringwirbelschicht 8 bezeichnet wird. Sowohl der Reaktor 1 als auch das Zentral-

rohr 3 können selbstverständlich auch einen anderen als den bevorzugten runden Querschnitt haben, solange die Ringwirbelschicht 8 das Zentralrohr 3 wenigstens teilweise umgibt. Durch die Zufuhrleitungen 19 eingeleitetes Fluidisierungsgas strömt durch den Gasverteiler und fluidisiert die Ringwirbelschicht 8, so dass sich ein stationäres Wirbelbett ausbildet. Vorzugsweise ist der Gasverteiler dazu als Düsenrost mit einer größeren Anzahl einzelner Düsen ausgebildet, die an die Zufuhrleitungen 19 angeschlossen sind. In einer einfacheren Ausführungsform kann der Gasverteiler auch als Rost mit einer darunter befindlichen Gasverteilerkammer ausgebildet sein. Die Geschwindigkeit der dem Reaktor 1 zugeführten Gase wird dabei so eingestellt, dass die Partikel-Froude-Zahl in der Ringwirbelschicht 8 etwa zwischen 0,115 und 1,15 beträgt.

Durch die Zufuhr von weiterem Feststoff in die Ringwirbelschicht 8 steigt das Feststoff-Niveau in dem Reaktor 1 so weit an, dass Feststoff an die Mündung des Zentralrohres 3 gelangt. Durch das Zentralrohr 3 wird ein vorzugsweise heißes Gas oder Gasgemisch mit einer Temperatur zwischen 200 bis 1000 °C in den Reaktor 1 eingeleitet. Die Geschwindigkeit des dem Reaktor 1 durch das Zentralrohr 3 zugeführten Gases wird vorzugsweise so eingestellt, dass die Partikel-Froude-Zahl in dem Zentralrohr 3 etwa zwischen 1,15 und 20 und in der Wirbelmischkammer 7 etwa zwischen 0,37 und 3,7 beträgt.

Aufgrund einer Überhöhung des Feststoff-Niveaus der Ringwirbelschicht 8 gegenüber der Oberkante des Zentralrohres 3 läuft Feststoff über diese Kante in das Zentralrohr 3 über. Die Oberkante des Zentralrohres 3 kann hierbei gerade oder anders geformt, bspw. gezackt, sein oder seitliche Öffnungen aufweisen. Aufgrund der hohen Gasgeschwindigkeiten reißt das durch das Zentralrohr 3 strömende Gas beim Passieren des oberen Mündungsbereichs Feststoff aus der stationären Ringwirbelschicht 8 in die Wirbelmischkammer 7 mit, wodurch sich eine intensiv durchmischte Suspension ausbildet.

An dem dem Reaktor 1 entgegengesetzten Ende des Zentralrohres 3 ist eine Mikrowellen-Quelle 2 angeordnet. Die dort erzeugten Mikrowellen-Strahlen werden über das als Hohlleiter 4 ausgebildete Zentralrohr 3 in die Wirbelmischkammer 7 eingeführt und tragen dort zumindest teilweise zum Aufheizen des Reaktors 1 bei.

Die Art der Auskopplung der Mikrowellen aus dem als Einspeiseleitung dienenden Hohlleiter 4 kann auf unterschiedlichem Wege erfolgen. Mikrowellenenergie kann in Hohlleitern theoretisch verlustfrei transportiert werden. Der Hohlleiterquerschnitt ergibt sich als logische Weiterentwicklung eines elektrischen Schwingkreises aus Spule und Kondensator zu sehr hohen Frequenzen hin. Ein solcher Schwingkreis kann theoretisch ebenfalls verlustfrei betrieben werden. Bei einer starken Erhöhung der Resonanzfrequenz wird aus der Spule eines elektrischen Schwingkreises eine halbe Wicklung, die der einen Seite des Hohlleiterquerschnittes entspricht. Der Kondensator wird zu einem Plattenkondensator, der ebenfalls zwei Seiten des Hohlleiterquerschnittes entspricht. Im Realfall verliert ein Schwingkreis Energie durch den ohmschen Widerstand in Spule und Kondensator. Der Hohlleiter verliert Energie durch den ohmschen Widerstand in der Hohlleiterwand.

Aus einem elektrischen Schwingkreis kann man Energie abzweigen, indem man einen zweiten Schwingkreis ankoppelt, der dem ersten Energie entzieht. Analog kann durch Anflanschen eines zweiten Hohlleiters an einen ersten Hohlleiter aus diesem Energie ausgekoppelt werden (Hohlleiterübergang). Wird der erste Hohlleiter hinter der Einkopplungsstelle durch einen Kurzschlussschieber abgesperrt, so kann sogar die gesamte Energie auf den zweiten Hohlleiter umgeleitet werden.

Die Mikrowellenenergie in einem Hohlleiter wird durch die elektrisch leitfähigen Wände eingeschlossen. In den Wänden fließen Wandströme und im Hohlleiter-



querschnitt existiert ein elektromagnetisches Feld, dessen Feldstärke mehrere 10 KV pro Meter betragen kann. Wird nun ein elektrisch leitfähiger Antennenstab in den Hohlleiter gesteckt, kann dieser die Potentialdifferenz des elektromagnetischen Feldes direkt ableiten und bei geeigneter Form an seinem Ende auch wieder abstrahlen (Antennen- oder Stiftauskopplung). Ein Antennenstab, der durch eine Öffnung in den Hohlleiter eintritt und an einer anderen Stelle die Hohlleiterwand berührt, kann weiterhin Wandströme direkt aufnehmen und ebenfalls an seinem Ende abstrahlen. Wird der Hohlleiter hinter der Antenneneinkopplung durch einen Kurzschlusschieber abgesperrt, so kann auch in diesem Fall die gesamte Energie aus dem Hohlleiter in die Antenne umgeleitet werden.

Wenn die Feldlinien der Wandströme in Hohlleitern durch Schlitze unterbrochen werden, so tritt durch diese Schlitze Mikrowellenenergie aus dem Hohlleiter aus (Schlitzauskopplung), da die Energie nicht in der Wand weiterfließen kann. Die Wandströme in einem Rechteckhohlleiter fließen auf der Mitte der breiten Hohlleiterseite parallel zur Mittellinie und auf der Mitte der schmalen Hohlleiterseite quer zur Mittellinie. Querschlitze in der Breitseite und Längsschlitze in der schmalen Seite koppeln daher Mikrowellenstrahlung aus Hohlleitern aus.

Die bspw. auf eine der vorbeschriebenen Arten aus dem Hohlleiter 4 ausgekoppelte Mikrowellenstrahlung wird durch die in der Wirbelmischkammer 7 gebildete Suspension, insbesondere die darin gebundenen Feststoffe, absorbiert und trägt zu deren Erhitzung bei. In der Wirbelmischkammer 7 findet dann die gewünschte Reaktion des körnigen Feststoffs mit dem durch das Zentralrohr 3 zugeführten Prozessgas statt. Die Temperatur liegt hier zwischen 200 und 1500°C. Abreagiertes körniges Material sinkt aufgrund einer Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit des in der Wirbelmischkammer 7 expandierten ersten Gases (Prozessgas) oder aufgrund von Stößen an die Reaktorwand in die Ringwirbelschicht 8 zurück und kann dort durch die Heizelemente 9 auf Soll-

temperatur erhitzt oder gehalten werden. Grobe Feststoffe können über eine Austragsleitung 10 abgezogen werden. Das den restlichen, nicht ausgefallenen Anteil an Feststoffen enthaltende Gas strömt in den oberen Teil des Reaktors, in dem die staubhaltigen Gase durch die Kühlelemente 12 herabgekühlt werden. Über den Auslass 13 werden die Gase in den als Abscheider dienenden Zyklon 14 geleitet, an dessen Kopfseite das Gas über eine Leitung 15 abgezogen und in einem Kühler 16 gekühlt wird. Das Gas wird in einem weiteren Abscheider 17, bspw. einem Zyklon oder Filter, entstaubt und als staubfreies Gas zur weiteren Verarbeitung teilweise durch die Leitungen 18, 19 über umlaufende Düsen von unten in die Ringwirbelschicht 8 zugeführt. Eine weitere Leitung 20 zweigt staubfreies Gas in die Zentraldüse 3 bzw. den Hohlleiter 4 ab und dient hier als Spülgas und/oder Prozessgas, um die Leitung 3, 4 staubfrei zu halten. Zusätzlich kann frisches Prozessgas über eine nicht dargestellte Leitung in das Zentralrohr 3 eingemischt werden.

Die in dem Abscheider abgetrennten Feststoffe, insbesondere Staub, werden über den Boden des Zyklons 14 in die Ringwirbelschicht 8 rezirkuliert, wobei hier die Möglichkeit besteht, feine Feststoffe als Produkt über Leitung 11 auszutragen. Auf diese Weise kann das Feststoffniveau in der Ringwirbelschicht 8 des Reaktors 1 einfach eingestellt werden. Zur Einstellung der Feststoffrückführung hat es sich erfindungsgemäß bewährt, den Druckverlust zwischen dem Zentralrohr 3 und der zum Abscheider 14 führenden Austrittsleitung (Auslass 13) des Reaktors 1 zu messen und durch Variation der zurückgeführten Feststoffmenge zu regeln. Als besonders vorteilhaft hat sich dafür ein fluidisierter Zwischenbehälter mit nachgeschaltetem Dosierorgan, bspw. einer drehzahlvariablen Zellenradschleuse oder einem Walzendrehschieber, erwiesen, wobei der nicht zur Rückführung benötigte Feststoff bspw. mittels eines Überlaufs ausgeschleust und einer weiteren Verwendung zugeführt werden kann. Die Feststoffrückführung trägt auf einfache Weise dazu bei, die Verfahrensbedingungen in dem

Reaktor 1 konstant zu halten und/oder die mittlere Verweildauer des Feststoffs in dem Reaktor 1 zu einzustellen.

5 In Fig. 2 ist der untere Teil des Reaktors 1 gemäß einer zweiten Ausführungsform dargestellt. Es sind zwei Mikrowellen-Quellen 2a, 2b vorgesehen, wobei an jede Mikrowellenquelle ein eigenes Zentralrohr 3a, 3b angeschlossen ist, um die Mikrowellen in die Wirbelmischkammer 7 einzuleiten. Auch in diesem Fall wird das Zentralrohr 3a, 3b direkt als Hohlleiter 4a, 4b verwendet. Beide Zentralrohre 3a, 3b werden über Leitung 20 mit staubfreiem Gas versorgt, welches hier auch  
10 wieder als Spülgas dient. Statt der zwei dargestellten Mikrowellen-Quellen 2a, 2b ist auch eine Vielzahl von Mikrowellen-Quellen mit einer entsprechenden Anzahl an Hohlleitern und Zentralrohren möglich, die unterhalb des Reaktors oder um den Reaktor herum angeordnet sind.

15 In Fig. 3 ist ebenfalls der untere Teil des Reaktors 1 dargestellt. Auch in dieser Ausführungsform des Reaktors 1 sind zwei Mikrowellen-Quellen 2a, 2b vorgesehen, die über je einen eigenen Hohlleiter 4a, 4b Mikrowellen in die Wirbelmischkammer eingeleitet werden. Die Hohlleiter 4a, 4b werden in das Zentralrohr 3 eingeführt und in diesem zur Wirbelmischkammer 7 geführt. Um eine Verschmutzung der Hohlleiter 4a, 4b zu vermeiden, werden sie mit staubfreiem Gas über Leitung 20 versorgt, welches hier als Spülgas dient. In diesem Fall wird das Zentralrohr 3 für die Einleitung von bspw. staubbeladenem Prozessgas verwendet. Für einen nachträglichen Umbau eines bestehenden Reaktors 1 braucht dafür nur ein Leitungsabschnitt des Zentralrohrs 3 geändert zu werden,  
25 damit eine gasdichte Durchführung der Hohlleiter 4a, 4b in das Zentralrohr 3 möglich ist. Statt der zwei dargestellten Mikrowellen-Quellen 2a, 2b ist wiederum eine Vielzahl von Mikrowellen-Quellen möglich, die unterhalb des Reaktors 1 oder um den Reaktor 1 herum angeordnet sind. Eine Vielzahl von Mikrowellenquellen ermöglicht es, die in den Reaktor 1 eingestrahlte Gesamtintensität  
30 der Mikrowellenstrahlung einfach durch Ein- und Ausschalten einzelner Mikro-

wellen-Quellen zu variieren, ohne die Betriebsparameter einer Mikrowellen-Quelle ändern zu müssen, auf die der Hohlleiter optimal angepasst ist.

5 Beim Anwenden des Verfahrens absorbieren die zu behandelnden Feststoffe mindestens teilweise die verwendete elektromagnetische Strahlung und erwärmen damit das Wirbelbett. Erstaunlicherweise hat sich gezeigt, dass insbesondere bei hohen Feldstärken behandeltes Material leichter gelaugt werden kann. Häufig lassen sich auch andere verfahrenstechnische Vorteile realisieren, wie z.B. verkürzte Verweilzeiten oder die Absenkung erforderlicher Prozesstemperaturen.

10

Der Reaktor 1 mit Zentralrohr 3 und Ringwirbelschicht 8 ist besonders geeignet für die thermische Behandlung von körnigem Material, da er sich durch die Kombination von sehr guten Stoff- und Wärmeaustauschcharakteristika mit

15 langen Feststoffverweilzeiten auszeichnet. Erfindungsgemäß wird der größte Teil des Prozessgases durch das Zentralrohr 3 in die Wirbelmischkammer 7 eingeleitet, so dass Feststoff aus der rund um das Zentralrohr angeordneten stationären Wirbelschicht 8 mit in die oberhalb dieser stationären Wirbelschicht 8 liegende Wirbelmischkammer 7 mitgerissen wird. Dies führt zu einer besonders gut durchmischten Suspension. Durch die Wahl der Querschnitte des Reaktors 1 wird dafür gesorgt, dass sich in der Wirbelmischkammer 7 eine niedrige mittlere Geschwindigkeit einstellt. Die Folge ist, dass der meiste Feststoff aus der Suspension ausregnet und in die Ringwirbelschicht 8 zurückfällt. Die sich zwischen Ringwirbelschicht und Wirbelmischkammer ausbildende

25 Feststoffzirkulation ist normalerweise um eine Größenordnung höher als der dem Reaktor von außen zugeführte Feststoffmassenstrom. Damit wird gewährleistet, dass der in der Wirbelschichtkammer vorhandene körnige Feststoff mehrfach die Zone der höchsten Mikrowellenleistungsdichte oberhalb des Zentralrohres passiert, in der der Feststoff die über Hohlleiter dort eingekoppelte

30 Mikrowellenstrahlung besonders gut absorbieren kann.

### Beispiel (Golderz-Röstung)

Ein konkretes Anwendungsbeispiel für das erfindungsgemäße Verfahren ist die  
5 Golderz-Röstung, die in einer Anlage gemäß Fig. 3 durchgeführt wird.

Die Partikel-Froude-Zahlen  $Fr_p$  liegen für diesen Anwendungsfall in der stationären Ringwirbelschicht 8 bei 0,35, in der Wirbelmischkammer 7 bei 1,3 und in dem Zentralrohr 3 bei 15. Die verwendete Mikrowellenfrequenz liegt bei 2,45  
10 GHz.

Aus der nachfolgenden Tabelle lassen sich die wesentlichen Verfahrensparameter entnehmen.

#### Feed

Typ Golderz, gemahlen, getrocknet und klassiert

Goldgehalt ca. 5 ppm  $\triangleq$  5 g/t

Kornfraktion		
	max	$\mu\text{m}$
		50
Zusammensetzung		
		Gew %
	org. C	1.05
	$\text{CaCO}_3$	19.3
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	12.44
	$\text{FeS}_2$	2.75
	Inertstoffe, z.B. $\text{SiO}_2$	64.46
	Feststoffdurchsatz, ca.	t/h
		100

### Apparatur

Typ des Reaktors Reaktor mit Ringwirbelschicht, Luftvorwärmung auf 500°C

angeschlossen: online-Gasanalytik + Abgaswäsche

Durchmesser, Reaktor- oberteil	mm	5000		
Arbeitsweise	kontinuierlich			
Installierte Mikrowellen- leistung	KW	6		
Hohlleiter	R26 (43 x 86mm, Edelstahl)			
Fluidisierluft				
Durchsatz	Nm³/h	9200		

### Betriebsbedingungen

Feststoff-Verweilzeit	Min	5		
Temperatur	°C	550	bis	650
Rest-O <sub>2</sub> im Abgas	vol%	0.5	bis	3.00

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff im Produkt ist kleiner 0.1%.

**Bezugszeichenliste:**

	1	Reaktor
	2, 2a, 2b	Mikrowellen-Quellen
5	3	Zentralrohr
	4, 4a, 4b	Hohlleiter
	5	Feststoffbunker
	6	Feststoffleitung
	7	Wirbelmischkammer
10	8	Ringwirbelschicht
	9	Heizelemente
	10	Austragsleitung
	11	Leitung
	12	Kühlelemente
15	13	Auslass, Austrittsleitung
	14	Abscheider, Zyklon
	15	Gas-Leitung
	16	Kühler
	17	Abscheider
	18	Gas-Leitung
	19	Zufuhrleitungen
	20	Gas-Leitung

## Patentansprüche

1. Verfahren zur thermischen Behandlung von körnigen Feststoffen in einem Reaktor (1) mit Wirbelschicht, bei dem Mikrowellenstrahlung aus einer Mikrowellen-Quelle (2) in den Reaktor (1) eingespeist wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein erstes Gas oder Gasgemisch von unten durch mindestens ein vorzugsweise zentrales Gaszufuhrrohr (3) in eine Wirbelmischkammer (7) des Reaktors eingeführt wird, wobei das Gaszufuhrrohr (3) wenigstens teilweise von einer durch Zufuhr von Fluidisierungsgas fluidisierten, stationären Ringwirbelschicht (8) umgeben wird, und dass die Mikrowellenstrahlung der Wirbelmischkammer (7) durch dasselbe Gaszufuhrrohr (3) zugeführt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Gasgeschwindigkeiten des ersten Gases oder Gasgemisches sowie des Fluidisierungsgases für die Ringwirbelschicht (8) derart eingestellt werden, dass die Partikel-Froude-Zahlen in dem Gaszufuhrrohr (3) zwischen 1 und 100, in der Ringwirbelschicht (8) zwischen 0,02 und 2 sowie in der Wirbelmischkammer (7) zwischen 0,3 und 30 betragen.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Partikel-Froude-Zahl in dem Gaszufuhrrohr (3) zwischen 1,15 und 20 beträgt.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Partikel-Froude-Zahl in der Ringwirbelschicht (8) zwischen 0,115 und 1,15 beträgt.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Partikel-Froude-Zahl in der Wirbelmischkammer (7) zwischen 0,37 und 3,7 beträgt.



6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Füllstand der Feststoffe in dem Reaktor (1) so eingestellt wird, dass sich die Ringwirbelschicht (8) über das obere Mündungsende des Gaszufuhrrohrs (3) hinaus erstreckt und dass ständig Feststoff in das erste Gas oder Gasgemisch eingetragen und von dem Gasstrom zu der oberhalb des Mündungsbereichs des Gaszufuhrrohrs (3) befindlichen Wirbelmischkammer (7) mitgeführt wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mikrowellenstrahlung durch ein als Hohlleiter (4, 4a, 4b) ausgebildetes Gaszufuhrrohr (3, 3a, 3b) und/oder durch einen in dem Gaszufuhrrohr (3) angeordneten Hohlleiter (4a, 4b) eingespeist wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mikrowellenstrahlung durch mehrere Hohlleiter (4a, 4b) eingespeist wird, wobei jeder Hohlleiter (4a, 4b) mit einer eigenen Mikrowellen-Quelle (2a, 2b) versehen ist.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass Spülgas durch den Hohlleiter (4, 4a, 4b) geführt wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die verwendete Frequenz für die Mikrowellen-Quelle (2) zwischen 300 MHz und 30 GHz liegt, vorzugsweise zwischen 400 MHz und 3 GHz, insbesondere bei den ISM-Frequenzen 435 MHz, 915 MHz und 2,45 GHz.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Querschnitt und die Abmessungen des Hohlleiters (4) an die verwendete Frequenz der Mikrowellenstrahlung angepasst werden.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Temperaturen in der stationären Ringwirbelschicht (8) zwischen 150 °C und 1500 °C liegen.

5 13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus dem Reaktor (1) ausgetragener und in einem nachgeschalteten Abscheider (14) abgeschiedener Feststoff zumindest teilweise in die Ringwirbelschicht (8) des Reaktors zurückgeführt wird.

10 14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass durch den Hohlleiter (4) eingespeistes Gas für eine zusätzliche Fluidisierung der stationären Wirbelschicht (8) genutzt wird.

15 15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Ausgangsmaterial feinkörniger Feststoff mit einer Korngröße von weniger als 1 mm zugeführt wird.

20 16. Anlage zur thermischen Behandlung von körnigen Feststoffen, insbesondere zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 15, mit einem als Wirbelschichtreaktor ausgebildeten Reaktor (1) und einer Mikrowellen-Quelle (2), **dadurch gekennzeichnet**, dass der Reaktor (1) ein Gaszuführungssystem aufweist, welches derart ausgebildet ist, dass durch das Gaszuführungssystem strömendes Gas Feststoff aus einer stationären Ringwirbelschicht (8), die das Gaszuführungssystem wenigstens teilweise umgibt, in die Wirbelmischkammer (7) mitreißt, und dass Mikrowellenstrahlung durch das Gaszuführungssystem einspeisbar ist.

25

30 17. Anlage nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Gaszuführungssystem ein sich vom unteren Bereich des Reaktors (1) im Wesentlichen vertikal nach oben bis in die Wirbelmischkammer (7) des Reaktors (1) erstre-

ckendes Gaszufuhrrohr (3) aufweist, wobei das Gaszufuhrrohr (3) von einer wenigstens teilweise um das Gaszufuhrrohr (3) herumführenden Kammer, in der die stationäre Ringwirbelschicht (8) ausgebildet ist, umgeben ist.

5 18. Anlage nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Gaszufuhrrohr (3), bezogen auf die Querschnittsfläche des Reaktors (1), in etwa mittig angeordnet ist.

10 19. Anlage nach einer der Ansprüche 16 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Gaszufuhrrohr (3) als Hohlleiter (4) zum Einspeisen der Mikrowellenstrahlung ausgebildet ist.

15 20. Anlage nach einem der Ansprüche 16 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, dass in dem Gaszufuhrrohr (3) mindestens ein Hohlleiter (4a, 4b) zum Einspeisen der Mikrowellenstrahlung angeordnet ist.

20 21. Anlage nach einem der Ansprüche 16 bis 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere Gaszufuhrrohre (3a, 3b) und/oder mehrere Hohlleiter (4a, 4b) vorgesehen sind, wobei an jeden Hohlleiter (4a, 4b) eine eigene Mikrowellen-Quelle (2a, 2b) angeschlossen ist.

22. Anlage nach einem der Ansprüche 19 bis 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Hohlleiter (4) einen rechteckigen oder runden Querschnitt hat.

25 23. Anlage nach einem der Ansprüche 19 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Hohlleiter (4) eine Länge von 0,1 m bis 10 m hat.

FIG. 1

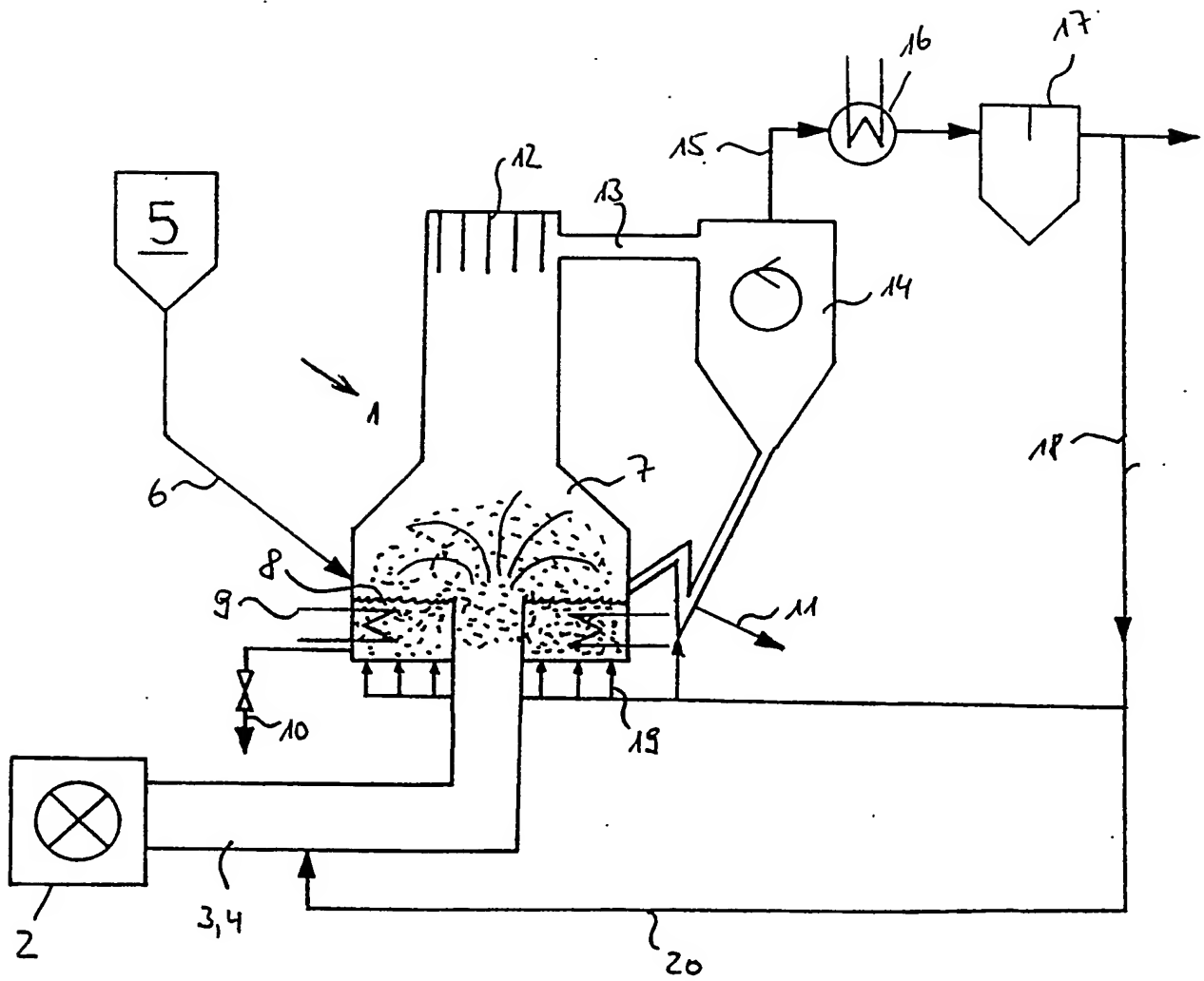


FIG. 2

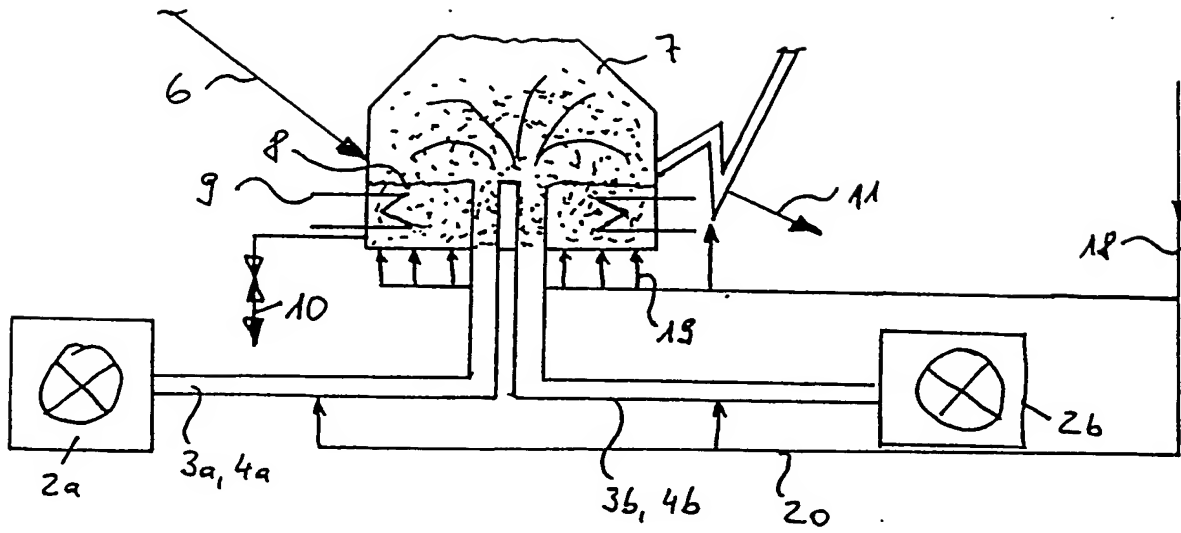
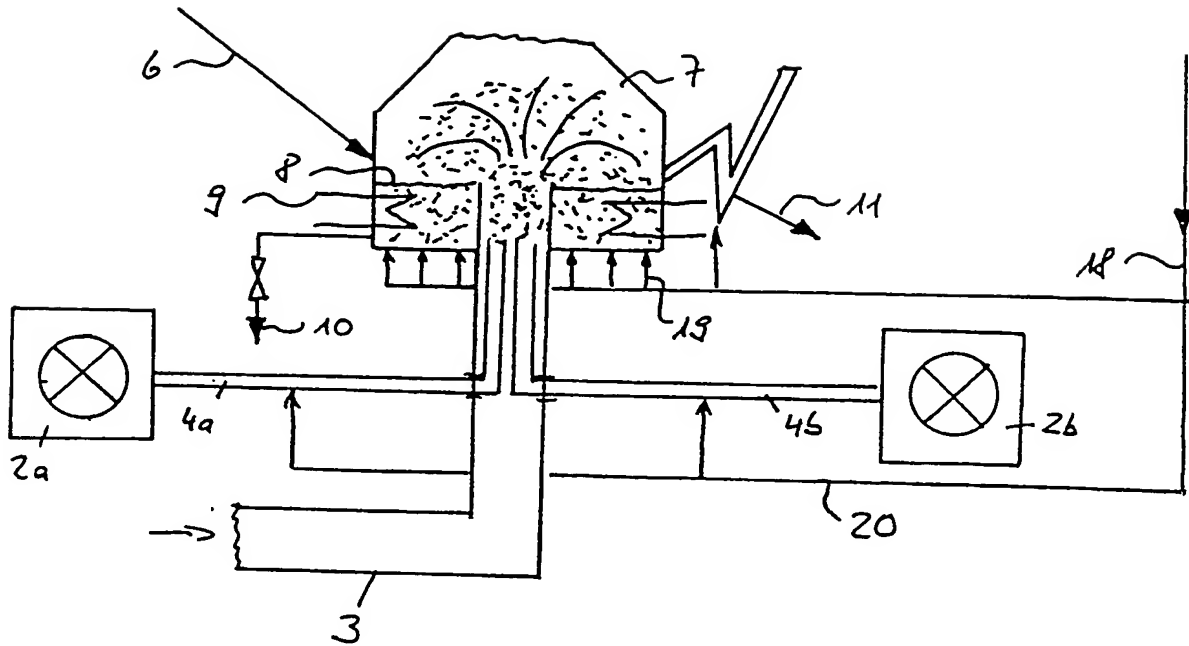


FIG. 3



Outokumpu Oyj  
Riihitontuntie 7

02200 Espoo  
Finnland

Zusammenfassung:

**Verfahren und Anlage zur thermischen Behandlung von körnigen Feststoffen**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur thermischen Behandlung von körnigen Feststoffen in einem Reaktor (1) mit Wirbelschicht, bei dem Mikrowellenstrahlung aus einer Mikrowellen-Quelle (2) in den Reaktor (1) eingespeist wird, sowie eine entsprechende Anlage. Um die Energieausnutzung und die Einspeisung der Mikrowellenstrahlung zu verbessern, wird ein erstes Gas oder Gasgemisch von unten durch ein vorzugsweise zentrales Gaszufuhrrohr (3) in eine Wirbelmischkammer (7) des Reaktors eingeführt, wobei das Gaszufuhrrohr (3) wenigstens teilweise von einer durch Zufuhr von Fluidisierungsgas fluidisierten, stationären Ringwirbelschicht (8) umgeben wird. Die Mikrowellenstrahlung wird dabei der Wirbelmischkammer (7) durch dasselbe Gaszufuhrrohr (3) zugeführt. (Fig. 1)